

**OPTIMASI PENEMPATAN GARDU TRAKSI LISTRIK ALIRAN ATAS
(LAA) ANTARA STASIUN CEPER – STASIUN GAWOK BERDASARKAN
PENURUNAN TEGANGAN UNTUK MENINGKATKAN KEANDALAN
PASOKAN DAYA LISTRIK KRL**



**Disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan Program Studi Strata I
pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik**

Oleh:

CANDRA RAHMAN HANANTO

D400170138

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURAKARTA
2021**

HALAMAN PERSETUJUAN

**OPTIMASI PENEMPATAN GARDU TRAKSI LISTRIK ALIRAN ATAS
(LAA) ANTARA STASIUN CEPER – STASIUN GAWOK BERDASARKAN
PENURUNAN TEGANGAN UNTUK MENINGKATKAN KEANDALAN
PASOKAN DAYA LISTRIK KRL**

PUBLIKASI ILMIAH

oleh:



CANDRA RAHMAN HANANTO

D400170138

Telah diperiksa dan disetujui untuk diuji oleh:

Dosen Pembimbing



Agus Supardi, S.T., M.T.

NIK. 883

HALAMAN PENGESAHAN

**OPTIMASI PENEMPATAN GARDU TRAKSI LISTRIK ALIRAN ATAS
(LAA) ANTARA STASIUN CEPER – STASIUN GAWOK BERDASARKAN
PENURUNAN TEGANGAN UNTUK MENINGKATKAN KEANDALAN
PASOKAN DAYA LISTRIK KRL**

OLEH

CANDRA RAHMAN HANANTO

D400170138

**Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji
Fakultas Teknik Program Studi Teknik Elektro
Universitas Muhammadiyah Surakarta
Pada hari Kamis, 22 Juli 2021
dan dinyatakan telah memenuhi syarat**

Dewan Penguji:

1. Agus Supardi, S.T., M.T.

(Ketua Dewan Penguji)

2. Tindyo Prasetyo, S.T., M.T.

(Anggota I Dewan Penguji)

3. Aris Budiman, S.T., M.T.

(Anggota II Dewan Penguji)

(.....)
(.....)
(.....)



Dekan,

Rois Fatoni, S.T., M.Sc., Ph.D

NIK. 892

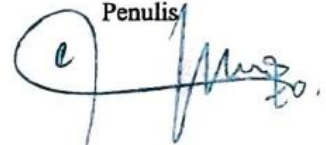
PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam publikasi ilmiah ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila kelak terbukti ada ketidakbenaran dalam pernyataan saya di atas, maka akan saya pertanggungjawabkan sepenuhnya.

Surakarta, 22 Juli 2021

Penulis



CANDRA/RAHMAN HANANTO

D400170138

OPTIMASI PENEMPATAN GARDU TRAKSI LISTRIK ALIRAN ATAS (LAA) ANTARA STASIUN CEPER – STASIUN GAWOK BERDASARKAN PENURUNAN TEGANGAN UNTUK MENINGKATKAN KEANDALAN PASOKAN DAYA LISTRIK KRL

Abstrak

Dewasa ini, kebutuhan akan suatu alat transportasi terus meningkat. Terutama untuk para *commuters*, yang dibutuhkan saat ini adalah angkutan massal yang murah, cepat, bebas hambatan, nyaman dan selalu tersedia seperti halnya kereta rel listrik (KRL). Moda transportasi baru yang menghubungkan kota Jogja-Solo ini harapannya akan terus meningkat dan semakin banyaknya masyarakat yang menggunakan transportasi KRL dengan diimbangi jumlah kereta yang mencukupi, sehingga semakin besar juga kebutuhan daya yang harus disuplai. Untuk menjaga keandalan pasokan daya listrik maka harus mengoptimalkan penempatan antar gardu traksi agar lebih efisien. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan jarak antara Gardu traksi Ceper dan Gawok yang optimal, sehingga mengurangi terjadinya gangguan pada kelancaran perjalanan KRL. Untuk mendapat jarak optimal, penelitian ini menggunakan perhitungan jatuh tegangan pada lintas yang terjadi pada KRL. Hasil perhitungan tersebut menunjukkan jarak optimal penempatan gardu traksi Ceper-Gawok adalah 8 km, dengan jatuh tegangan maksimal 144,33 VDC atau 9,62% dari batas maksimum yang diperbolehkan yaitu 10 % dari tegangan nominal 1500 VDC (PM No 50 : 2018).

Kata Kunci: gardu traksi, KRL, jatuh tegangan, transportasi.

Abstract

Nowadays, the need for a means of transportation continues to increase. Especially the commuters, what is needed now is mass transportation that is cheap, fast, barrier-free, comfortable and always available, such as electric rail trains (KRL). It is hoped that this new mode of transportation that connects the city of Jogja-Solo will continue to increase and more people will use KRL transportation with an adequate number of trains, so that the demand for power supply will also increase. To maintain the reliability of the electric power supply, it is necessary to optimize the placement between the traction substations to be more efficient. The purpose of this study was to obtain the optimal distance between the Ceper and Gawok traction substations, thereby reducing the occurrence of disturbances in the smooth journey of the KRL. To get the optimal distance, this study uses the calculation of the voltage drop on the line that occurs on the KRL. The results of these calculations show that the optimal distance for the Ceper-Gawok traction substation is 8 km, with a maximum voltage drop of 144.33 VDC or 9.62% of the maximum allowable limit, which is 10% of the nominal voltage of 1500 VDC (PM No 50: 2018).

Keywords: substation, electric train, voltage drop, transportation.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

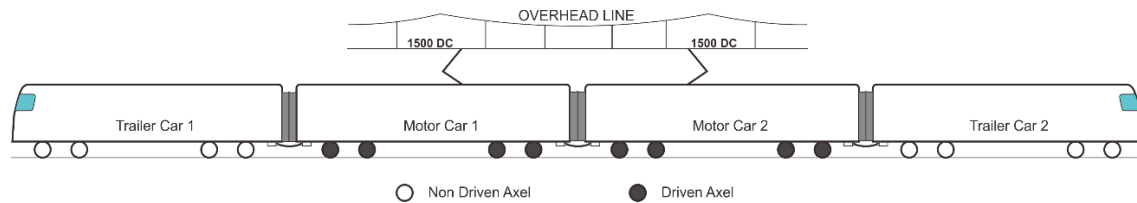
Perkembangan sistem angkutan umum massal (SAUM) di perkotaan belakangan ini sangat pesat. Terutama perkembangan di bidang perkeretaapian mengalami pertumbuhan yang dinamis. Transportasi kereta api saat ini menjadi primadona untuk perjalanan jarak menengah. Seperti halnya jarak kota Jogja - Solo yang bisa ditempuh lebih cepat dengan transportasi kereta api. Saat ini sudah terhubung moda transportasi baru yaitu kereta rel listrik (KRL) yang menggantikan kereta api Prameks. Seperti halnya kereta api Prameks, KRL juga tetap menjadi pilihan utama penduduk Jogja Solo, terutama untuk para *commuters*, yaitu orang-orang yang bertempat tinggal di Solo, tetapi bekerja di Jogja atau sebaliknya yang menjadikan kereta sebagai pilihan utama untuk perjalanannya. Angkutan umum bus kota dan antar kota tidak dapat sepenuhnya memenuhi kebutuhan angkutan massal yang murah, cepat, bebas hambatan, dan selalu tersedia.

Kebutuhan akan suatu alat transportasi umum pada saat ini memang terus meningkat, seperti halnya KRL Jogja-Solo harapannya juga akan terus meningkat dan semakin banyak masyarakat yang menggunakan KRL. Peningkatan ini tentunya harus diimbangi jumlah kereta yang mencukupi, sehingga semakin besar juga kebutuhan daya yang harus disuplai dan jika dimungkinkan harus ada penambahan gardu. Apabila tidak dilakukan penambahan pada gardu maka akan sering terjadi *trip* karena kurangnya suplai daya yang dibutuhkan oleh setiap unit kereta, atau dengan mengoptimalkan penempatan jarak antar gardu traksi agar lebih efisien dan menghindari terjadinya penurunan tegangan yang diakibatkan karena meningkatnya beban KRL yang semakin besar. Penempatan jarak gardu traksi LAA diusahakan seminimal mungkin dengan tetap memenuhi kebutuhan daya dari tiap unit kereta. Optimasi penempatan gardu traksi LAA ini mencakup dua aspek yaitu ditinjau dari segi jarak antar gardu dan dari segi kebutuhan daya.

Berdasarkan latar belakang masalah tersebut, dapat diidentifikasi permasalahan yaitu keandalan sistem berkaitan terjadinya jatuh tegangan di lintas dan jarak penempatan gardu traksi listrik aliran atas yang optimal. Tujuan diadakannya penelitian ini adalah mengetahui kondisi sistem kelistrikan pada KRL di lintas Jogja-Solo berkaitan dengan penempatan gardu traksi LAA dan mengoptimalkan penempatan gardu traksi LAA di petak Gawok-Ceper.

1.2 Kereta Rel Listrik (KRL)

Kereta Rel Listrik (KRL) adalah kereta api yang dalam satu set rangkaian terdiri atas beberapa kereta (4-8-12 kereta atau 10 kereta setiap set), menggunakan listrik sebagai tenaga penggerak yang berasal dari aliran atas atau menggunakan rel ketiga. KRL komuter digunakan juga untuk angkutan dari pusat kota besar ke kota kecil yang jaraknya berkisar 60 km sampai 100 km, misalnya KRL Jogja-Solo dan KRL Jabodetabek.



Gambar 1. KRL tampak samping

1. *Motor Car* (MC), kereta yang membawa motor traksi, terdapat empat motor traksi (motor AC) masing-masing di MC1 dan MC2 serta juga membawa peralatan yang diperlukan untuk mengalirkan daya listrik dari infrastruktur listrik luar, seperti pantograf untuk sistem aliran atas dan *shoes collector* untuk sistem rel ketiga.
2. *Trailer Car* (TC), kereta dengan kabin kemudi untuk mengontrol kereta (dua unit di ujung). Pada TC umumnya terdapat unit motor-kompresor dan motor generator (MG) set untuk catu daya. (Haroen, 2017)

1.2.1 Prinsip Kerja Kereta Rel Listrik

Kereta rel listrik merupakan kereta yang sumber daya utamanya menggunakan listrik. Daya Listrik yang dibutuhkan oleh KRL ini akan disuplai menggunakan kawat konduktor yang membentang di bagian atas sepanjang rute KRL tersebut yang disebut dengan sistem *catenary* atau LAA (Listrik Aliran Atas). Untuk menyalurkannya ke kereta digunakan piranti bernama pantograf yang akan mengalirkan listrik dari sumber di atas ke konverter yang kemudian diteruskan ke motor sehingga KRL berjalan.

Konsumsi energi kereta listrik terbilang besar. Saat ini sudah ada banyak teknik yang diusulkan untuk mengurangi konsumsi energi kereta listrik, seperti mengadopsi pola *motorcoach* untuk membuat kereta lebih kompak dan lebih ringan, mengubah tampilan lokomotif untuk mengurangi hambatan aerodinamis, melengkapi rem regeneratif untuk memancing kembali energi kinetik, dan lain-lain. Di sisi lain, strategi mengemudi yang tepat juga dapat mengurangi konsumsi energi kereta listrik (Li et al, 2013)

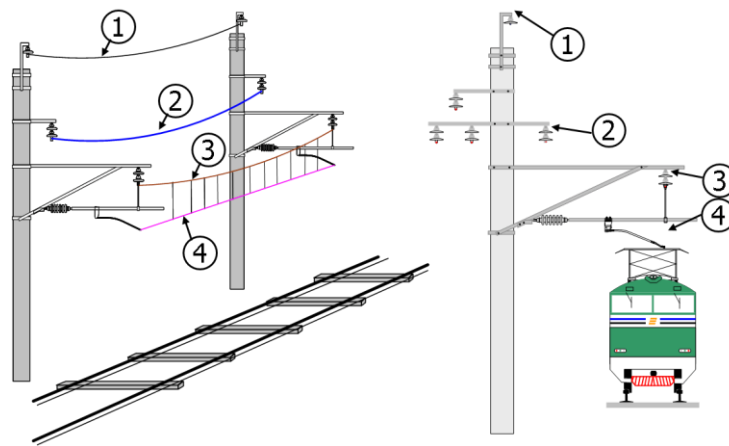
1.2.2 Headway

Headway adalah interval atau selang waktu antara saat dimana bagian depan kereta api melalui titik (stasiun) sampai dengan saat bagian depan kereta api berikutnya melalui satu titik (stasiun) yang sama dengan satuan menit/ KA. (Putra, 2019)

1.3 Listrik Aliran Atas (LAA)

Listrik Aliran Atas adalah peralatan menyuplai tenaga untuk membuat kereta listrik pindah. LAA, terdiri dari tiang-tiang dan kabel yang ditemukan di sepanjang rel listrik, sekarang banyak dipakai untuk menjalankan kereta di seluruh dunia. Meski konsep LAA itu sederhana, masalahnya

adalah perilaku dinamis yang buruk dari LAA yang dibutuhkan untuk berkembang. Struktur tiang, yang ramping kolom, harus diamati karena getarannya (Ngamkhanong et al, 2017). Sistem listrik aliran atas/*overhead equipment* (OHE) merupakan suatu proses penyaluran daya listrik dari sumber melalui pantograph ke motor traksi di *rolling stock*. Penyaluran daya listrik dengan sistem aliran atas menggunakan kawat sebagai penyalur daya listrik yang digantungkan pada tiang-tiang sepanjang jalan kereta. Sistem ini memiliki tegangan kerja 1500 V DC, dan arus balik melalui rel. Pada sistem LAA, kawat *trolley* adalah kawat bertegangan (positif) yang berada di atas dan bagian negatifnya pada rel di bagian bawah.



Gambar 2. Jaringan LAA

Keterangan :

1. OHGW (*Overhead Ground Wire*)
2. Kawat *Feeder* (Penyulang)
3. Kawat *Messenger*
4. Kawat *Trolley*

Daya pada KRL diperoleh dari LAA yang dialirkan melalui pantograf, yang berupa arus DC (*Direct Current*). Hal ini dikarenakan arus DC memiliki kelebihan untuk meminimalisir gangguan serta optimalisasi penggunaan daya dengan jarak stasiun yang dekat, namun penggunaan arus DC memiliki kelemahan seperti harus terdapat penyuplai daya sebagai pengganti daya yang berkurang akibat tegangan jatuh. Batas minimal KRL (daya) dapat bergerak adalah 100 V - 1600 V dimana penggunaan daya dipengaruhi oleh panjang kabel, hambatan gardu, hambatan kereta, dan jumlah penggunaannya.

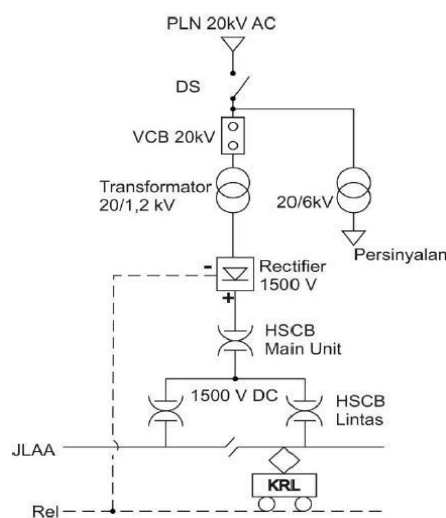
1.3.1 Gardu Traksi / *Substation*

Sistem transportasi elektrik kendaraan rel membutuhkan catu daya khusus arus searah (DC) atau arus bolak-balik (AC). Untuk memperoleh catu daya khusus ini, diperlukan suatu gardu listrik (*substation*) yang mengubah besaran listrik jaringan PLN (3 fase) menjadi besaran listrik

satu fase dengan nilai tertentu pada frekuensi yang sama atau berbeda atau tegangan listrik arus searah. Gardu traksi berfungsi mensuplai daya dengan tegangan 1500 VDC sebagai sumber tenaga KRL. Sumber daya utama berasal dari suplai daya PLN dengan tegangan 20 kV kemudian disalurkan pada transformator daya penurun tegangan 3 fase menjadi 1200 V AC yang kemudian disearahkan dengan menggunakan *rectifier* dari 1200V AC menjadi 1500V DC sebagai tegangan operasi yang digunakan oleh KRL.

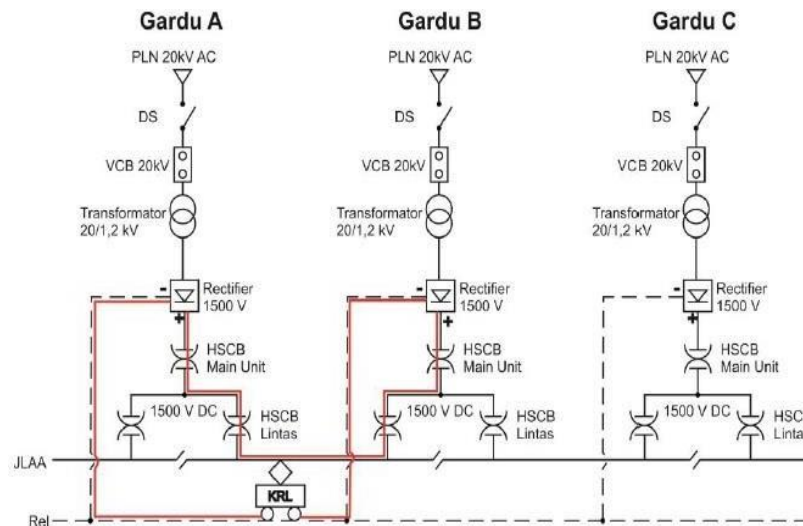
Dalam sistem traksi DC, gardu traksi disuplai oleh jaringan tiga fase tegangan tinggi dan biasanya berisi sebuah trafo traksi khusus dan penyearah yang tidak terkendali. Untuk mengurangi distorsi harmonik dari arus suplai, struktur penyearah dua belas pulsa sering diadopsi, terdiri dari dua jembatan dioda yang dihubungkan secara seri atau paralel dan disuplai dari dua belitan sekunder dari trafo, satu dihubung bintang dan yang lainnya dihubung delta. (Popescu et al, 2015)

1.4 Sistem Penyuplaian Dua Sisi



Gambar 3. *Single line* Gardu Traksi KRL

Sistem penyuplaian daya untuk listrik aliran atas menggunakan sistem penyuplaian dua sisi. Sistem ini menyuplai daya untuk KRL dengan menggunakan 2 gardu traksi yang bersebelahan dalam satu petak jalan/petak jalan lain yang terhubung dengan interkoneksi secara paralel sehingga diperoleh total kapasitas daya yang sesuai dengan kebutuhan operasional KRL.



Gambar 4. Sistem penyuplaian dua sisi gardu traksi

Pada gambar 4 diperlihatkan sistem penyuplaian daya dengan menggunakan sistem penyuplaian 2 sisi, yaitu dari gardu traksi A dan B menyuplai daya untuk KRL secara paralel. Tegangan negatif rel dari dialirkan ke penyerah/*rectifier* gardu traksi A dan B. Pada saat terjadi gangguan yang menyebabkan gardu traksi tidak dapat beroperasi, maka gardu traksi lain (di sebelahnya) bisa digunakan untuk mencatu daya KRL pada petak jalan itu.

1.5 Resistansi

Resistansi antara rel dan bumi menyebabkan sebagian dari arus trek untuk meninggalkan rel, yang dikenal sebagai "arus nyasar" (Marulli & Cook, 2018). Pada sistem listrik aliran atas, kawat *trolley* dan *messenger* terpasang paralel begitu juga dengan kawat *feeder* yang menyuplai *trolley*. Jadi untuk mendapatkan nilai resistansi total, harus mencari resistansi paralel dari ketiga kawat tersebut dengan persamaan berikut.

$$R_{TM} = \frac{R_T \times R_M}{R_T + R_M} \quad (1)$$

Keterangan : R_{TM} : Resistansi paralel *Trolley & Messenger*

R_T : Resistansi *Trolley*

R_M : Resistansi *Messenger*

Setelah mendapatkan resistansi paralel *trolley wire* dengan *messenger wire*, maka selanjutnya dihitung resistansi total.

$$R_{Total} = \frac{R_{TM} \times R_F}{R_{TM} + R_F} \quad (2)$$

Keterangan: R_{Total} : Resistansi Total

R_{TM} : Resistansi paralel *Trolley & Messenger*

R_F : Resistansi *Feeder*

Selanjutnya mencari nilai hambatan kawat penghantar dengan persamaan berikut :

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3)$$

Keterangan: R : Hambatan kawat (ohm Ω)

ρ : hambatan jenis (Ω m)

l : Panjang kawat (m)

A : Luas penampang (m^2)

1.6 Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan adalah besarnya penurunan voltase terukur akhir dibandingkan dengan voltase yang direncanakan. Setiap kabel pasti memiliki hambatan dalam, sehingga saat arus mengalir melalui konduktor tersebut, maka sepanjang kabel akan terjadi perubahan voltase. Semakin panjang sebuah kabel, maka jatuh tegangan akan semakin besar.

Masalah penurunan tegangan di sepanjang saluran *catenary* atau tegangan sistem rendah adalah masalah kualitas daya yang membatasi. Tegangan sistem rendah biasanya terjadi di ujung saluran yang dibebani berat, yang disuplai oleh satu gardu induk atau di tengah saluran yang disuplai oleh dua gardu induk di kedua ujungnya. Tegangan sistem yang rendah membatasi kinerja lokomotif diumpankan oleh saluran yang terpengaruh dan juga membatasi daya transmisi maksimum di sepanjang saluran. (Bahrani et al, 2012).

Perhitungan jatuh tegangan maksimum dapat dicari dengan persamaan berikut :

$$\Delta V_{\max} = \frac{2R_0 + \Gamma L}{4} \times I \quad (4)$$

Keterangan :

V_{\max} : jatuh tegangan maksimum

R_0 : *Internal resistance* Gardu Listrik Aliran Atas (GLAA)

Γ : tahanan jenis kawat penghantar (Ω/km)

L : jarak antara gardu traksi (km)

I : arus maksimum saat kereta melintas (A)

2. METODE

Penelitian ini hanya berfokus pada perhitungan mengenai jarak penempatan gardu traksi Ceper-Gawok berdasar jatuh tegangan. Penelitian ini menggunakan metode kualitatif dan kuantitatif untuk mendapat hasil analisa yang akurat. Metode kualitatif dilakukan dengan cara wawancara dan observasi secara mendalam terhadap subjek dan metode kuantitatif dilakukan dengan cara survei dan mengambil data untuk kemudian mengolahnnya untuk mendapatkan nilai jatuh tegangan yang optimal. Salah satu metodenya yaitu dengan mengambil data arus dan tegangan *outgoing* gardu traksi pada saat kereta

listrik melintas *section* tersebut selama 3 hari untuk mengamati nilai tegangan dan arus yang paling besar konsumsinya selama melintas *section* Ceper-Gawok sehingga nilai jatuh tegangan maksimal dapat diketahui dan dapat dilakukan ujicoba penempatan gardu traksi berdasarkan jatuh tegangan. Selain itu data hambatan kawat penghantar, hambatan internal gardu traksi, *headway* kereta, jarak antar Gardu Traksi Ceper-Gawok, dan kecepatan rata-rata KRL saat melintas.

2.1 Pengumpulan Data

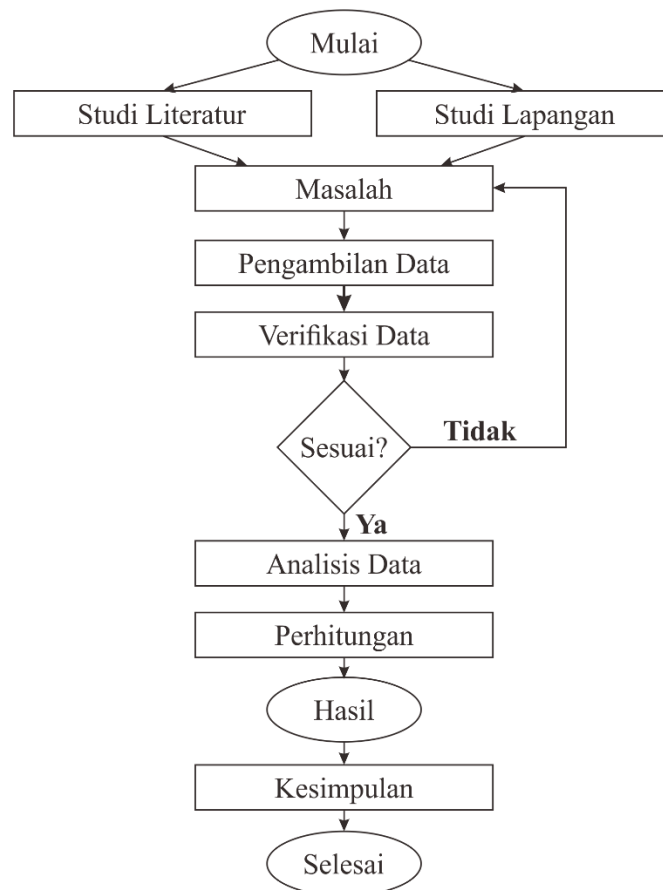
Metodologi yang dilakukan dalam pengumpulan data untuk skripsi ini sebagai berikut :

- a. Studi literatur, yaitu dengan cara mengkaji dan mencari teori-teori yang mendukung untuk pemecahan masalah yang diteliti. Teori-teori ini bersumber dari jurnal ilmiah, buku, dan hasil penelitian sebelumnya yang dapat mendukung penelitian ini. Studi literatur juga dilakukan untuk mendapatkan data-data dari penelitian sebelumnya yang dapat dijadikan acuan.
- b. Pengujian dan observasi, yaitu dengan cara mengumpulkan data-data yang diperlukan untuk penelitian dan didapat dari lapangan dengan melakukan observasi secara langsung ke lapangan.
- c. Diskusi, yaitu dengan melakukan konsultasi dan bimbingan dengan dosen, pembimbing lapangan dan pihak-pihak lain yang dapat membantu terlaksananya penelitian ini.

2.2 Analisis Data

Setelah data berhasil terkumpul, penulis membuat tahapan penelitian yang digunakan sebagai alur penelitian, adapun tahapan-tahapannya sebagai berikut:

- a. Melakukan perhitungan resistansi paralel *trolley wire* dengan *messenger wire*.
- b. Melakukan perhitungan resistansi total dengan *feeder wire* setelah mendapatkan hasil dari perhitungan resistansi paralel *trolley wire* dengan *messenger wire*.
- c. Melakukan perhitungan jatuh tegangan.
- d. Menentukan jarak yang optimal untuk penempatan gardu traksi listrik aliran atas (LAA).



Gambar 5. Flowchart penelitian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada kereta rel listrik lintas Jogja Solo saat ini terdapat 8 titik gardu traksi untuk menyuplai kebutuhan daya untuk perjalanan kereta dan jarak tiap gardu rata-rata berkisar 6 km - 8 km. Berbeda dengan *section* yang lain, untuk Gardu Traksi Ceper – Gardu Traksi Gawok berjarak 11,801 km. Jarak tersebut terbilang jauh dari rata-rata dan memungkinkan terjadi jatuh tegangan yang besar pada *section* tersebut yang bisa menyebabkan menurunnya keandalan pasokan daya listrik untuk KRL. Pada saluran listrik aliran atas KRL Jogja – Solo terdiri dari 2 jalur, masing-masing tersusun dari beberapa kawat penghantar untuk menyalurkan tegangan kerja 1500 VDC.

3.1 Arus dan Tegangan *Outgoing* Gardu

Penelitian ini berfokus pada penempatan gardu traksi LAA antara Ceper-Gawok dengan menggunakan perhitungan untuk menentukan jarak penempatan gardu LAA Gawok-Ceper yang optimal. Dalam perhitungan ini menggunakan data arus tegangan keluaran dari kedua Gardu pada saat KRL melintas baik dari sisi hulu maupun hilir untuk mendapatkan data arus dan tegangan paling besar. Berdasarkan data KAI Commuter jumlah volume tertinggi pengguna KRL ada di pukul 06.00 - 07.00 WIB di pagi hari dan pukul 17.00 – 18.00 WIB. Berdasarkan acuan tersebut, pengambilan data terfokus di jam sibuk pagi dan sore hari.

Tabel 1. Data arus dan tegangan outgoing Gardu Traksi Gawok tanggal 02/04/2021

Waktu	Tegangan (V)				Arus (A)			
	Feeder				Feeder			
	1	2	3	4	1	2	3	4
2021 04 02 06:11:21	1600	1624	1595	1588	-126	-122	0	652
2021 04 02 06:11:22	1600	1622	1592	1588	-126	-138	0	652
2021 04 02 06:11:23	1600	1622	1592	1616	-126	-138	0	780
2021 04 02 06:11:24	1632	1622	1592	1616	-147	-138	0	780
2021 04 02 06:11:25	1632	1579	1589	1616	-147	-138	0	780
2021 04 02 06:11:26	1632	1579	1589	1577	-147	-138	0	982
2021 04 02 06:11:27	1602	1579	1589	1577	-147	-138	0	982
2021 04 02 06:11:28	1602	1578	1632	1577	-147	-158	0	982
2021 04 02 06:11:29	1602	1578	1632	1600	-147	-158	0	1008
2021 04 02 06:11:30	1605	1578	1632	1600	-159	-158	0	1008
2021 04 02 06:11:31	1605	1613	1578	1600	-159	-158	0	1008
2021 04 02 06:11:32	1605	1613	1578	1604	-159	-158	0	1022
2021 04 02 06:11:33	1583	1613	1578	1604	-159	-158	0	1022
2021 04 02 06:11:34	1583	1683	1603	1604	-159	-154	0	1022
2021 04 02 06:11:35	1583	1683	1603	1591	-159	-154	0	1134
2021 04 02 06:11:36	1597	1683	1603	1591	-161	-154	0	1134
2021 04 02 06:11:37	1597	1598	1608	1591	-161	-169	0	1134
2021 04 02 06:11:38	1597	1598	1608	1594	-161	-169	0	1301
2021 04 02 06:11:39	1575	1598	1608	1594	-165	-169	0	1301
2021 04 02 06:11:40	1575	1574	1574	1594	-165	-169	0	1301
2021 04 02 06:11:41	1575	1574	1574	1578	-165	-169	0	1011
2021 04 02 06:11:42	1581	1574	1574	1578	-165	-169	0	1011
2021 04 02 06:11:43	1581	1609	1617	1578	-165	-154	0	1011
2021 04 02 06:11:44	1581	1609	1617	1610	-165	-154	0	1007
2021 04 02 06:11:45	1578	1609	1617	1610	-160	-154	0	1007
2021 04 02 06:11:46	1578	1609	1575	1610	-160	-154	0	1007
2021 04 02 06:11:47	1578	1609	1575	1616	-160	-154	0	987
2021 04 02 06:11:48	1605	1609	1575	1616	-160	-154	0	987
2021 04 02 06:11:49	1605	1596	1615	1616	-160	-156	0	987

Pengambilan data arus dan tegangan diambil dari dua gardu traksi Ceper dan Gawok pada waktu yang sama. Pengambilan data arus dan tegangan KRL pada sisi hilir yaitu dari feeder 3 gardu traksi Gawok dan feeder 1 gardu traksi Ceper, sedangkan pengambilan data arus dan tegangan KRL pada sisi hulu yaitu feeder 4 gardu traksi Gawok dan feeder 2 gardu traksi Ceper.

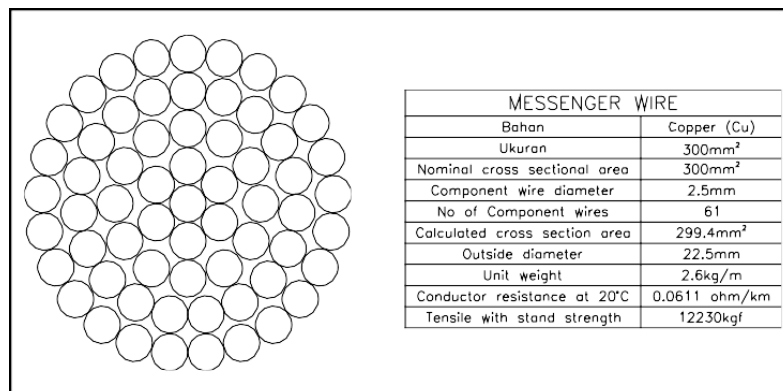
Tabel 2. Data arus dan tegangan *outgoing* Gardu Traksi Ceper 02/04/2021

Waktu	Tegangan (V)				Arus (A)			
	Feeder				Feeder			
	1	2	3	4	1	2	3	4
2021 04 02 06:11:27	1590	1615	1565	1638	0	598	-116	-120
2021 04 02 06:11:28	1590	1615	1565	1638	0	598	-116	-120
2021 04 02 06:11:29	1678	1615	1565	1570	0	598	-116	-120
2021 04 02 06:11:30	1678	1807	1802	1570	65	-77	0	-120
2021 04 02 06:11:31	1678	1807	1802	1796	65	-77	0	0
2021 04 02 06:11:32	1703	1807	1802	1796	65	-77	0	0
2021 04 02 06:11:33	1703	1699	1673	1796	77	0	0	0
2021 04 02 06:11:34	1703	1699	1673	1741	77	0	0	0
2021 04 02 06:11:35	1691	1699	1673	1741	77	0	0	0
2021 04 02 06:11:36	1691	1648	1628	1741	85	85	0	0
2021 04 02 06:11:37	1691	1648	1628	1733	85	85	0	0
2021 04 02 06:11:38	1736	1648	1628	1733	85	85	0	0
2021 04 02 06:11:39	1736	1628	1618	1733	0	106	0	0
2021 04 02 06:11:40	1736	1628	1618	1609	0	106	0	0
2021 04 02 06:11:41	1627	1628	1618	1609	0	106	0	0
2021 04 02 06:11:42	1627	1697	1691	1687	0	86	0	0
2021 04 02 06:11:43	1627	1697	1691	1687	0	86	0	0
2021 04 02 06:11:44	1691	1697	1691	1687	0	86	0	0

3.2 Resistansi Kawat Penghantar

Transmisi tenaga listrik arus searah untuk pergerakan kereta menggunakan konstruksi *overhead system*. Sistem konstruksi yang terpasang di lintas Jogja-Solo menggunakan *system catenary single trolley* dengan komponen sebagai berikut :

- Feeder wire*, terbuat dari bahan *Cu* yang berdimensi 300 mm², pada interval tertentu dicabangkan dengan kawat kontak melalui *feeding branch*.

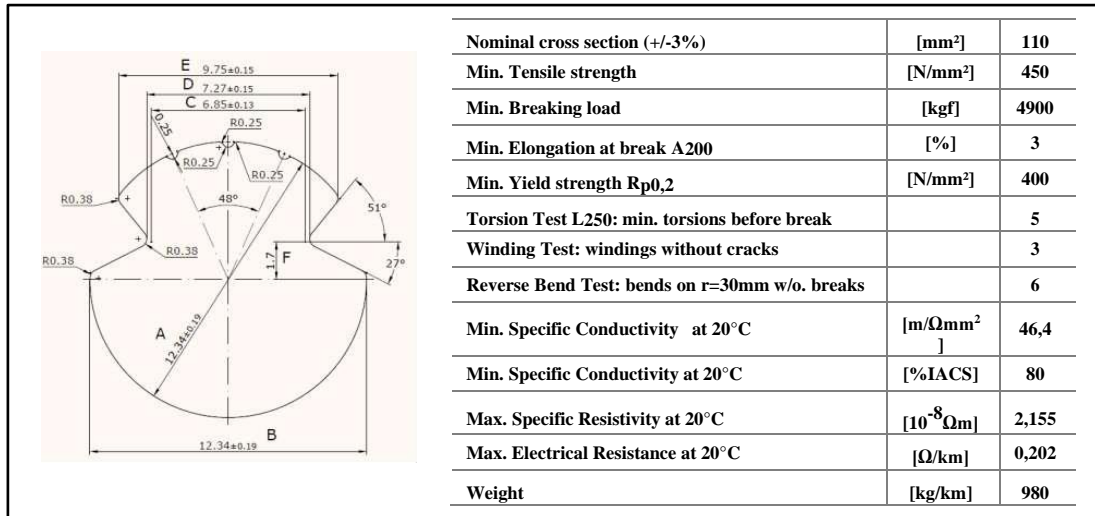


Gambar 6. Spesifikasi *feeder wire*

Resistivity kawat *feeder* belum diketahui, maka dicari dengan persamaan (3) $\rho = R \frac{A}{l}$

$$\rho = 0,0611 \, \Omega \times \frac{0,0003 \, m^2}{1000 \, m} = 0,00000001833 = 1,833 \times 10^{-8} \, \Omega \, m$$

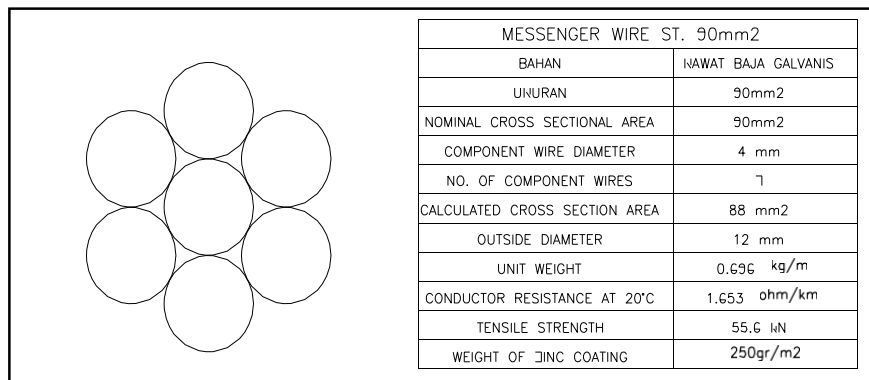
b. *Contact wire*



Gambar 7. Spesifikasi *contact wire*

c. *Messenger wire*

Menggunakan kawat baja agar mempunyai kekuatan tarik lebih besar, sehingga lendutnya pendek.



Gambar 8. Spesifikasi *Messenger wire*

Perhitungan hambatan jenis *messenger wire* menggunakan persamaan (3)

$$\rho = R \frac{A}{l}$$

$$\rho = 1,653 \, \Omega \times \frac{0,00009 \, m^2}{1000 \, m} = 0,0000001487 = 14,87 \times 10^{-8} \, \Omega \, m$$

Tabel 3. Resistansi kawat penghantar listrik arus searah

Jenis Kawat	L (m)	A (mm ²)	Hambatan jenis (ρ)	R (Ω m)
<i>Trolley wire</i> 1 x Cu 110 mm ²	1000	0,00011	0,00000002155	0,1959
<i>Messenger wire</i> 1 x St 90 mm ²	1000	0,000090	0,0000001487	1,653
<i>Feeder wire</i> 1 x Cu 300 mm ²	1000	0,0003	0,00000001833	0,0611

3.3 Perhitungan Jatuh Tegangan Maksimum

Pada gardu traksi Ceper dan Gawok diketahui daya *silicon rectifier* sebesar 4000 kW. Besarnya *Internal resistance* gardu traksi (R_0) dengan daya SR 4000 kW yaitu 0,0365 Ω. Hasil perhitungan hambatan jenis kawat penghantar total sebesar 0,042 (Ω/km). Serta jarak antara gardu Ceper-Gawok sebesar 11,801 km.

Perhitungan jatuh tegangan maksimum pada petak Gawok-Ceper dihitung dengan persamaan (4)

$$\Delta V_{\max} = \frac{2R_0 + \Gamma L}{4} \times I$$

$$= \frac{2 \times 0,0365 + 0,042 \times 11,801}{4} \times 1386 = 197,03 \text{ V}$$

Tabel 4. Hasil perhitungan jatuh tegangan dengan *headway* 12 menit pada tanggal 02/04/2021

Internal Resistance Ro (Ω)	R (Ω/km)	L (km)	I KRL (A)				ΔVmax (V)	Waktu
			GT Gawok		GT Ceper			
			feeder 3	feeder 4	feeder 1	feeder 2		
			GWK-CE hilir	GWK-CE hulu	GWK-CE hilir	GWK-CE hulu		
0,0365	0,042	11,801	947		0		134,6259935	06:51:16
0,0365	0,042	11,801		1050		0	149,268525	16:20:08
0,0365	0,042	11,801	1185		0		168,4601925	16:46:14
0,0365	0,042	11,801		1301		85	197,034453	06:11:38

3.4 Perhitungan Penentuan Jarak dua GLAA

Jarak antara 2 GLAA	= L km
<i>Headway</i>	= 12 menit
Arus maksimum	= 1386 A
R_0	= 0,0365 Ω
Γ	= 0,042 Ω/km
ΔV_{\max}	= 197,03 V

KRL dengan kecepatan 60 km/jam

$$\begin{aligned}
 S &= L \text{ km} \\
 v &= 60 \text{ km/jam} = 1 \text{ km/menit} \\
 t &= S/v = L \text{ menit} \\
 \text{Headway} &= 12 \text{ menit} \\
 \text{Jumlah KRL} &= (L/12) \times 2 = L/6 \text{ KRL} \\
 \text{Arus yang dibutuhkan} &= (L/6) \times 1386 = 231L \text{ A} \\
 \text{dari persamaan (4)} \quad \Delta V_{\max} &= \frac{2R_0 + rL}{4} \times I
 \end{aligned}$$

dari nilai-nilai yang sudah diperoleh :

$$197,03 = \frac{2 \times 0,0365 + 0,042L}{4} \times 231L$$

Maka : $L_1 = -9,924 \text{ km}$ (tidak mungkin)

$$L_2 = 8,18 \text{ km} \approx 8 \text{ km}$$

Tabel 4. Hasil Perhitungan jatuh tegangan dan penentuan jarak dengan headway 12 menit

Internal Resistance R_0 (Ω)	R (Ω)	L (km)	Arus Total KRL (A)	ΔV_{\max} (V)	Jarak (km)		Ket	Headway (menit)	Kecepatan (km/jam)
					L_1	L_2			
0,0365	0,042	11,801	1386	197,034453	-9,924	8,18	OPTIMAL	12	60
0,0365	0,042	8,18	1386	144,33804		8,18	OPTIMAL	12	60

Tabel 5. Hasil perhitungan penentuan jarak dengan perbedaan headway

Internal Resistance R_0 (Ω)	R (Ω)	L (km)	Arus Total KRL (A)	ΔV_{\max} (V)	Jarak (km)		Ket	Headway (menit)	Kecepatan (km/jam)
					L_1	L_2			
0,0365	0,042	11,801	1386	197,034453	-9,924	8,18	OPTIMAL	12	60
0,0365	0,042	11,801	1386	197,034453	-13,104	11,366	OPTIMAL	22	60
0,0365	0,042	11,801	1386	197,034453	-15,1119	13,381	OPTIMAL	30	60
0,0365	0,042	11,801	1386	197,034453	-21,038	19,302	OPTIMAL	60	60

Tabel 6. Hasil perhitungan penentuan jarak dengan perbedaan kecepatan KRL

Internal Resistance R_0 (Ω)	R (Ω)	L (km)	Arus Total KRL (A)	ΔV_{\max} (V)	Jarak (km)		Ket	Headway (menit)	Kecepatan (km/jam)
					L_1	L_2			
0,0365	0,042	11,801	1386	197,034453	-9,924	8,18	OPTIMAL	12	60
0,0365	0,042	11,801	1386	197,034453	-11,314	9,571	OPTIMAL	12	80
0,0365	0,042	11,801	1386	197,034453	-11,94	10,21	OPTIMAL	12	90
0,0365	0,042	11,801	1386	197,034453	-12,519	10,781	OPTIMAL	12	100

4. PENUTUP

Kesimpulan dalam penelitian ini adalah penempatan jarak antara 2 GLAA di petak Gawok-Ceper pada jalur ganda dan *headway* 12 menit untuk KRL dengan kecepatan rata-rata KRL di petak Gawok-Ceper 60 km/jam adalah 8 km dengan jatuh tegangan 144,33 V masih di bawah 10% dari batas jatuh tegangan yang diperbolehkan. Saat ini jaraknya adalah 11,801 km, apabila dimungkinkan, maka bisa dengan penambahan gardu sisipan untuk mengatasi sering terjadinya *trip* karena besarnya konsumsi arus dan tegangan KRL pada petak Gawok-Ceper yang penempatan jarak gardu kurang optimal, sehingga kurang maksimalnya suplai daya yang dibutuhkan oleh setiap unit kereta yang dikarenakan jatuh tegangan. Hasil perhitungan dengan perbedaan *headway* menunjukkan semakin lama *headway* kereta maka semakin jauh penempatan jarak gardu traksinya serta hasil perhitungan dengan perbedaan kecepatan menunjukkan semakin cepat KRL maka penempatan jarak gardu traksi juga semakin jauh. Untuk saat ini belum menggunakan sistem *headway* yang jarak waktunya konstan seperti di Jabodetabek sehingga jatuh tegangan masih aman untuk jarak 11,801 km.

PERSANTUNAN

Segala puji bagi Allah SWT, Tuhan seluruh alam atas nikmat sehat dan kesempatan menuntut ilmu sampai detik ini dan atas hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir ini. Sholawat dan salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW beserta keluarga, para sahabat, dan pengikut-pengikut Rasulullah SAW, insyaAllah termasuk kita semua hingga akhir zaman. Ucapan terimakasih penulis juga kepada :

1. Bapak dan Ibu yang senantiasa memberikan semangat dan doa, serta seluruh dukungan.
2. Bapak Agus Supardi, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan ilmu dan bimbingan tugas akhir ini kepada penulis.
3. Bapak Umar, S.T., M.T. Bapak dan Ibu Dosen Teknik Elektro UMS yang telah memberikan ilmu dan nasehat-nasehatnya selama menempuh perkuliahan di program studi Teknik Elektro UMS.
4. Kakak saya yang selalu memotivasi agar cepat selesai penelitian ini.
5. Bang Yusril, Bang Slamet, Pak Nugraha, Pak Sugiyana, Pak Sukan dan segenap teknisi di project pembangunan gardu traksi untuk elektrifikasi KRL jogja-solo yang telah memberikan bimbingan di lapangan, memberikan data yang dibutuhkan dan memberikan izin untuk melakukan penelitian.
6. Sahabat-sahabat saya di Kos Merantouna dan Kontrakan Hamzee yang selalu memotivasi.
7. Teman-teman kuliah yang sudah memberikan dukungan serta bantuannya selama melakukan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Bahrani, Behrooz, Alfred Rufer, and Martin Aeberhard. 2012. "Catenary Voltage Support: Adopting Modern Locomotives with Active Line-Side Converters." *IEEE Transactions on Smart Grid* 3(1): 377–87.
- Haroen, Yanuarsyah. 2017. *Sistem Transportasi Elektrik*. Bandung : ITB Press
- Li, Liang et al. 2013. "Minimal-Energy Driving Strategy for High-Speed Electric Train with Hybrid System Model." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 14(4): 1642–53.
- Marulli, George, and Ian Cook. 2018. "Earthing and Negative Return Systems in the Melbourne DC Railway." *2018 Down to Earth Conference, DTEC 2018 - Proceedings*: 1–8.
- Ngamkhanong, Chayut, Sakdirat Kaewunruen, Charalampos Baniotopoulos, and Mayorkinos Papaefthymiou. 2017. "Crossing Phenomena in Overhead Line Equipment (OHLE) Structure in 3D Space Considering Soil-Structure Interaction." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 245(3): 0–7.
- Popescu, Mihaela et al. 2015. "System for Converting the DC Traction Substations into Active Substations." : 632–37.
- Putra, Febi Wiratama. 2019. "Perhitungan Efektivitas Gardu Traksi Bojong Gede Pada Lintas Manggarai-Bogor. Progam Studi Teknologi Elektro Perkeretaapian , Politeknik Perkeretaapian Indonesia Madiun." III(November).